

Monitoramento da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais entre 2005 e 2007

Luis Marcelo Tavares de Carvalho¹
Fausto Weimar Acerbi Junior¹
José Roberto Soares Scolforo¹
Humberto Candeias Cavalcanti²

¹ Universidade Federal de Lavras - UFLA
Caixa Postal 3037 - 37200-000 - Lavras - MG, Brasil
{passarinho, jscolforo, fausto}@ufla.br

² Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais - IEF-MG
Rua Espírito Santo, 495 - 30160-030 - Belo Horizonte - MG, Brasil
humberto.candeias@meioambiente.mg.gov.br

Abstract. This paper describes the methodology used for monitoring changes in forest and natural vegetation cover in Minas Gerais, Brazil. The state of Minas Gerais is characterized by a large geographical extent and an intense fragmentation history. Both characteristics limit the application of traditional change detection algorithms demanding a large number of trained interpreters to separate noise from real land cover changes. Hence, the objective of this work was to develop and implement a procedure for digital change detection which is less sensitive to errors caused by misregistration, phenological state of the vegetation and atmospheric conditions. Landsat images from circa 2005 and circa 2007 acquired over Minas Gerais, as well as a land cover map produced in 2005 were used for change detection. The methodology is based on multiresolution wavelet analysis and local maxima detection in order to pinpoint multiscale change objects. The change objects were recursively segmented from coarse to fine scale levels. The results showed that the method is less sensitive to radiometric and geometric misregistration. A new data base relative to vegetation cover classes for the year 2007 was produced and the change statistics were presented for the state of Minas Gerais

Palavras-chave: remote sensing, image processing, forest monitoring, sensoriamento remoto, processamento de imagens, monitoramento florestal.

1. Introdução

Para o presente trabalho foi desenvolvido um algoritmo computacional para detecção e segmentação semi-automática de áreas que foram submetidas a modificações drásticas na cobertura do solo. Os conceitos deste algoritmo começaram a ser desenvolvidos por Carvalho et al. (2001) na intenção de facilitar, num contexto operacional, a detecção de mudanças na cobertura do solo, usando dados radiométricos coletados por sensores remotos.

O principal objetivo do algoritmo é reduzir a quantidade de ruídos em imagens diferença produzidas pelos métodos tradicionais de detecção de mudanças usando dados radiométricos, como por exemplo, diferenciação e razão de imagens, componentes principais, análise de vetor de modificação, etc.

Uma revisão detalhada sobre os métodos de detecção de modificações na cobertura do solo usando sensoriamento remoto pode ser encontrada em Singh (1989). Imagens diferença produzidas por qualquer um destes métodos geram resultados contaminados por ruídos, principalmente devido aos efeitos dos erros de registro das imagens multitemporais das condições atmosféricas no momento do imageamento, e, da fenologia das formações vegetais.

Estas características têm limitado o uso da detecção de mudanças baseada em radiometria, por demandarem uma avaliação cuidadosa dos resultados para separar as mudanças reais daquelas causadas por ruídos. Tais limitações são mais pronunciadas quando grandes extensões

territoriais estão sob avaliação. Estas limitações ficam mais evidentes no caso de áreas que sofreram intensa fragmentação.

O Estado de Minas Gerais apresenta ambas as características listadas no parágrafo anterior: grande extensão territorial e, histórico de intensa fragmentação. Neste caso, para detectar modificações na cobertura do solo usando métodos baseados em radiometria, seria necessário um grande número de interpretes treinados executando análises visuais para separar o ruído das modificações reais.

No processo de detecção de modificações usando sensoriamento remoto imagens tomadas em diferentes épocas são comparadas. Esta comparação apresenta as mesmas dificuldades de análises que consideram apenas uma data de aquisição e geram novos problemas relacionados com a integração dos conjuntos de dados multitemporais.

Existem vários desafios que devem ser superados para uma análise coerente das séries temporais geradas através de sensoriamento remoto: (1) erros sempre ocorrem durante o processo de registro e georreferenciamento das imagens multitemporais; (2) o poder de resolução dos sensores, o grau de fragmentação da paisagem e a natureza da transição entre as feições na superfície da Terra determinam a extensão das modificações passíveis de serem detectadas; (3) a escala temporal em que as modificações ocorrem variam de acordo com o processo em consideração; (4) condições atmosféricas no momento da tomada da imagem podem gerar diferenças que, se confundem com as modificações na cobertura do solo; (5) a resposta radiométrica dos objetos que se encontram sobre a superfície da Terra pode não ser captada quando consideramos a resolução espectral dos sensores; (6) a condições fenológicas da vegetação variam diferenciadamente ao longo do ano para os mais diversos tipos vegetacionais; (7) algumas modificações são graduais e sua detecção é problemática usando as tecnologias atuais.

Assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver e aplicar uma metodologia que fosse menos sensível às limitações apresentadas para realizar o monitoramento via sensoriamento remoto de todo o Estado de Minas Gerais. Especificamente, os ruídos causados por imperfeições no registro e georreferenciamento das imagens, por variações nas condições atmosféricas e por diferentes estágios fenológicos da vegetação foram considerados.

2. Material e Métodos

2.1 Base de dados

Para realizar a detecção de modificações, foram comparadas imagens coletadas à cerca de 2005 e 2007 pelo sensor TM (Thematic Mapper). Este sensor encontra-se a bordo do satélite Landsat 5. As imagens coletadas pelo Landsat TM apresentam 30 m de resolução espacial e sete bandas espectrais, sendo seis na região do espectro eletromagnético, conhecida como ótica e, uma na região conhecida como termal.

Os dados foram adquiridos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A seleção das cenas foi feita levando em consideração a qualidade das imagens, e uma quantidade de nuvens mínima ou nula quando possível.

O monitoramento da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais foi realizado a partir do conjunto de imagens acerca de 2005 e 2007.

Além do conjunto multitemporal de imagens de sensoriamento remoto, também foi utilizado um mapa temático (Figura 1) produzido em estudos anteriores (Carvalho et al. 2006a, Carvalho et al. 2006b) que faz parte do monitoramento contínuo desenvolvido pelo IEF-MG (Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais).

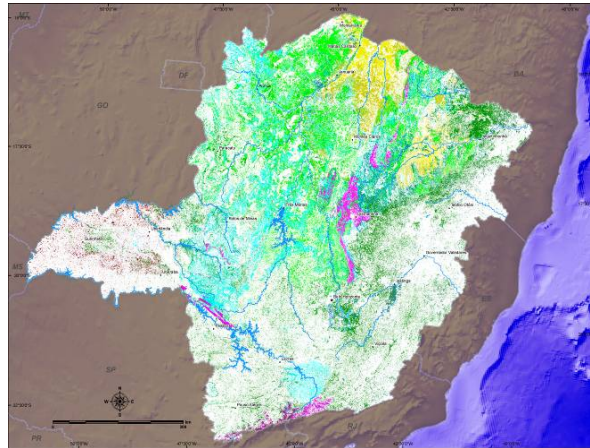


Figura 1. Mapa da Flora Nativa de Minas Gerais 2005.

2.2 Melhorias na base de dados de 2005

A utilização intensiva das informações geradas no Monitoramento 2005 (Scolforo & Carvalho, 2006) feita por diversas instituições como SEMAD, IEF, IGAM, FEAM, UFLA, IBAMA e CEMIG, entre outras, permitiu identificar as necessidades e sugestões dos usuários. As melhorias feitas na base de dados visaram contemplar essas necessidades e sugestões retificando eventuais imperfeições, o que torna o produto mais útil para a sociedade. As modificações melhoraram o detalhamento temático das fitofisionomias florestais e aumentaram a acurácia temática.

2.2.1 Modificação da legenda

A nova legenda foi adotada a partir do Workshop realizado pela coordenação do Inventário da Florestal de Minas Gerais e o Instituto Estadual de Florestas – IEF, MG. O Workshop contou com a participação dos principais especialistas em vegetação atuantes no Estado de Minas Gerais (Oliveira Filho et al., 2006). Além disso, modificações foram realizadas para contemplar os intervalos de altitude propostos por Veloso et al. (1991). Na Tabela 1 é apresentada a correspondência entre as legendas utilizadas no Monitoramento 2005 e no Monitoramento 2007.

Tabela 1. Nova legenda para o mapa da Flora Nativa e dos Reflorestamentos em Minas Gerais.

Nomenclatura Nova	Nomenclatura Antiga
Floresta ombrófila sub montana	Floresta ombrófila densa/mista
Floresta ombrófila montana	Floresta ombrófila densa/mista
Floresta ombrófila alto montana	Floresta ombrófila densa/mista
Floresta estacional semidecidual sub montana	Floresta estacional semidecidual
Floresta estacional semidecidual montana	Floresta estacional semidecidual
Floresta estacional decidual sub montana	Floresta estacional decidual
Floresta estacional decidual montana	Floresta estacional decidual
Campo	Campo de altitude/limpo/sujo
Campo rupestre	Campo rupestre
Campo cerrado	Campo cerrado
Cerrado	Cerrado sensu stricto
Cerradão	Cerradão
Vereda	Vereda
Eucalipto	Eucalipto
Pinus	Pinus

2.2.2 Retificações temáticas

Os trabalhos de campo executados pelos técnicos do IEF e pela equipe de inventário florestal do LEMAF possibilitaram a identificação e correção de eventuais discordâncias entre classes indicadas no mapa. Durante os trabalhos foram registradas informações fitossociológicas detalhadas pelas equipes de inventário, bem como fichas de campo com dados sobre a localização das discordâncias pelos técnicos do IEF. Estes dados foram processados no sistema de informações geográficas para que fragmentos de vegetação classificados erroneamente pudessem ser corrigidos.

As principais retificações ocorreram nas classes arbustivo-arbórea da flora nativa e na classes eucalipto refrente aos reflorestamentos (Tabela 2).

Tabela 2. Retificação no mapa de cobertura do solo.

Fisionomias	2005		2005 Retificado		Retificações	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Floresta ombrófila	224.503	0.38	224.282	0.38	-221	0.00
Floresta estacional semidecidual	5.222.582	8.91	5.214.768	8.89	-7.814	-0.01
Floresta estacional decidual	2.040.920	3.48	2.040.867	3.48	-53	0.00
Campo	3.872.318	6.60	3.844.963	6.56	-27.355	-0.05
Campo rupestre	617.234	1.05	616.009	1.05	-1225	0.00
Campo cerrado	1.501.992	2.56	1.489.256	2.54	-12.736	-0.02
Cerrado	5.560.615	9.48	5.503.991	9.39	-56.624	-0.10
Cerradão	355.011	0.61	353.388	0.60	-1.623	0.00
Vereda	406.887	0.69	406.253	0.69	-634	0.00
Eucalipto	1.015.633	1.73	1.217.864	2.08	202.231	0.34
Pinus	151.634	0.26	143.395	0.24	-8.239	-0.01

2.3 Subtração de imagens NDVI

As análises foram executadas sobre índices de vegetação. Índices de vegetação extraídos de imagens de sensoriamento remoto são muito utilizados para ressaltar áreas vegetadas em detrimento de áreas que apresentam outros tipos de cobertura. No monitoramento 2007 foi utilizado o índice conhecido como NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) devido a sua simplicidade computacional e comprovada sensibilidade aos processos de modificação da cobertura vegetal.

Os índices foram calculados para os conjuntos de imagens relativas a 2005 e a 2007. As imagens resultantes foram comparadas cena a cena, pixel a pixel por subtração dos valores de NDVI apresentados em cada época, gerando a chamada “imagem diferença”. Na imagem diferença, valores próximos de zero indicam áreas onde não ocorreram mudanças na cobertura vegetal. Valores positivos indicam áreas onde houve diminuição de cobertura vegetal e valores negativos indicam áreas onde houve um crescimento expressivo da cobertura vegetal no período em consideração.

2.4 Análise redundante com ondaletas: o algoritmo “à trous”

Transformadas, ondaletas redundantes apresentam capacidade de redução de ruído superior quando comparadas com transformadas mais tradicionais por não variarem em função do processo de translação e, por não apresentarem distorções nos resultados da redução de ruído. A

transformada redundante conhecida como algoritmo “à trous” foi desenvolvida por Holschneider et al. (1989) e utilizada no presente trabalho.

O resultado da implementação do algoritmo em duas dimensões foi obtido utilizando ondaletas separáveis aplicadas nas imagens linha por linha e, coluna por coluna via convolução matemática com uma ondaleta *spline* cúbica, correspondente ao filtro $h = (1/16, 1/4, 3/8, 1/4, 1/16)$.

2.5 Limiarização das escalas da transformada ondaleta

Redução de ruídos consiste na modelagem de um dado sinal digital y pela estimativa da função resposta média f e do resíduo. Essa estimativa baseia-se na representação da resposta média como uma combinação linear de funções base e o vetor de coeficientes associados. O vetor de coeficientes é chamado de a transformada de f . Portanto, o problema de estimar f usando o vetor conhecido y é composto por três passos principais:

- 1) cálculo da transformada de y ,
- 2) seleção de um subconjunto S de coeficientes significativos no intuito de remover o resíduo do modelo de regressão, e
- 3) inversão da transformada usando apenas o subconjunto S de coeficientes para obter a curva de regressão:

O subconjunto S pode ser obtido usando uma função limiar apropriada aplicada aos coeficientes da transformada ondaleta. No presente estudo foi usada a função conhecida como limiar suave (Donoho & Johnstone 1994):

Neste caso, é importante ressaltar que, o valor do limiar T pode variar de escala para escala gerando uma avaliação adaptativa em termos de localização dos detalhes que ocorrem na imagem em consideração.

Existem maneiras diferentes para selecionar um valor de T apropriado para ser usado na função limiar. Neste estudo, o valor do limiar foi calculado estatisticamente baseado no desvio absoluto mediano (Persival e Walden, 2000):

2.6 Correlação usando produtos de múltiplas escalas

Os primeiros estudos para o cálculo de correlações espaciais usando produtos de múltiplas escalas foram desenvolvidos por Rosenfeld et al. (1971). O procedimento é baseado no fato de que variações abruptas e detalhes importantes da imagem apresentam coeficientes com valores mais altos ao longo de todas as escalas da transformada ondaleta, ao passo que, coeficientes atribuídos aos ruídos diminuem rapidamente ao longo do conjunto de múltiplas escalas. Assim, multiplicando escalas adjacentes podemos ressaltar detalhes importantes da imagem e reduzir ruídos.

A correlação $P_j(t)$ é obtida pelo produto ponto a ponto dos coeficientes da transformada ondaleta de escalas adjacentes:

$$P_j(t) = \prod_{j=1}^j W_j(t), \quad (9)$$

Normalmente é suficiente explorar a correlação especial usando duas escalas adjacentes. Outra característica importante é que empregando apenas duas escalas, todas as estruturas presentes na imagem diferença passam a apresentar valores positivos (Figura 3).

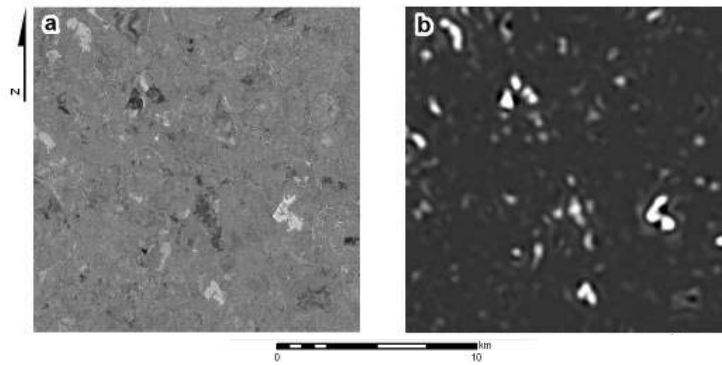


Figura 3. Imagem diferença (a) e produto das escalas 4x5 (b).

2.7 Detecção de pontos de máxima nos produtos das múltiplas escalas

As imagens relativas aos produtos das múltiplas escalas serviram como dados de entrada para um algoritmo de detecção de pontos de máxima local. A seleção automática de locais que sofreram modificações é possível, pois, erros de registro e georreferenciamento são captados nas escalas mais detalhadas, ao passo que mudanças gerais, como aquelas causadas por variações fenológicas e atmosféricas, são captadas nas escalas mais grosseiras.

Os produtos de múltiplas escalas são calculados usando apenas escalas intermediárias possibilitando a redução de ruído e diminuindo o esforço de identificação das áreas que sofreram modificações reais. Nesta etapa, os pontos de máxima local são identificados nas imagens que representam os produtos de múltiplas escalas quando o valor de determinado pixel é maior que seus oito vizinhos imediatos (Figura 4).

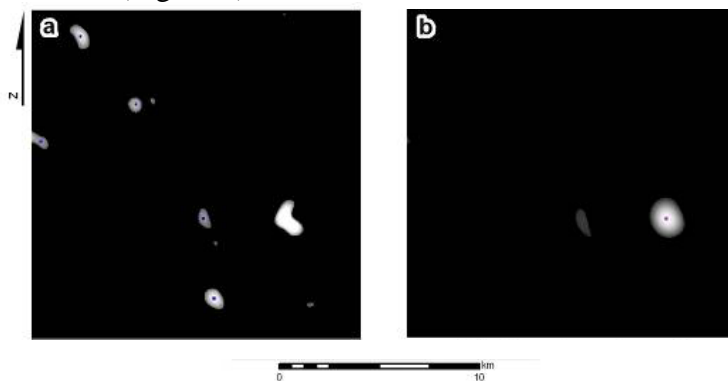


Figura 4. Pontos de máxima detectados nos produtos das escalas 5x6 (a) e 6x7 (b).

2.8 Segmentação de mudanças em múltiplas escalas

No caso de modificações abruptas na radiometria das imagens adquiridas em data diferentes, como por exemplo, desmatamentos e cortes rasos e queimadas, a determinação do que representa mudança na imagem diferença é facilmente obtida através do fatiamento dos níveis de cinza da imagem diferença. No presente estudo, a segmentação das regiões que sofreram modificações foi realizada utilizando um algoritmo de crescimento de regiões. Cada ponto de máxima detectado e seus oito pixels vizinhos foram agrupados para formar uma região inicial.

O processo de segmentação é iniciado pela avaliação dos vizinhos desta região inicial de acordo com determinada regra de inclusão definida e de forma interativa pelo interprete. A definição se um pixel deve ser incluído na região inicial, é feita a partir do cálculo da média e desvio padrão da região em questão. Para cada novo pixel incluído na região, um novo cálculo de média e desvio padrão é realizado. Este procedimento é repetido para cada ponto de máxima detectado nos diversos produtos de múltiplas escalas gerados pelo procedimento (Figura 5).

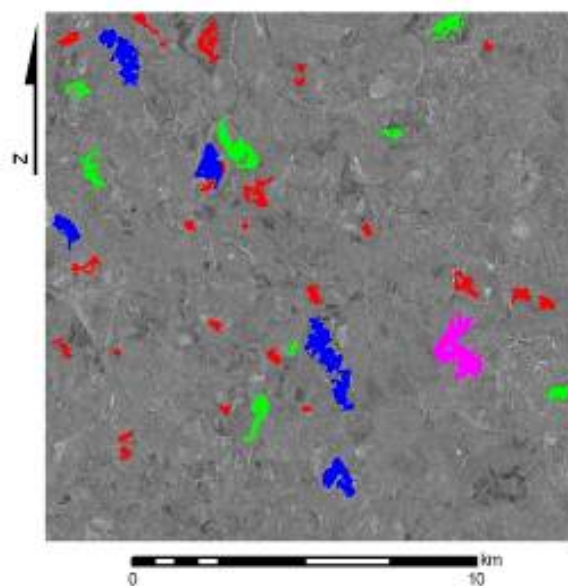


Figura 5. Mudanças segmentadas a partir dos pontos de máxima detectados nos produtos 3x4 (vermelho), 4x5 (verde), 5x6 (azul), e 6x7 (magenta).

Maiores detalhes sobre os métodos utilizados neste trabalho podem ser encontrados em Carvalho et al. (2007) e Carvalho et al. (2008).

3. Resultados

O procedimento descrito neste artigo foi aplicado a todas as cenas que recobrem o Estado de Minas Gerais para segmentar as modificações ocorridas entre 2005 e 2007. Na tabela 3 estão apresentados os resultados da detecção de modificações que ocorreram no período.

Tabela 3. Área, percentual e diferença no período 2005-2007 da Flora Nativa no Estado de Minas Gerais.

Fisiomonía	2005		2007		Diferença no período	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Floresta Ombrófila Montana	128.562	0,22	128.483	0,22	-79	0,00
Floresta Ombrófila Sub Montana	1.134	0,00	1.134	0,00	0	0,00
Floresta Ombrófila Alto Montana	94.586	0,16	94.511	0,16	-76	0,00
Floresta Estacional Semidecidual Montana	4.531.269	7,73	4.505.837	7,68	-25.432	-0,04
Floresta Estacional Semidecidual Sub Montana	678.103	1,16	675.544	1,15	-2.558	0,00
Floresta Estacional Decidual Montana	1.332.815	2,27	1.328.512	2,27	-4.303	-0,01
Floresta Estacional Decidual Sub Montana	708.052	1,21	706.545	1,20	-1.507	0,00
Campo	3.860.335	6,58	3.844.963	6,56	-15.372	-0,03
Campo Rupestre	617.239	1,05	616.009	1,05	-1.230	0,00
Cerrado	5.552.508	9,47	5.504.795	9,39	-47.712	-0,08
Campo Cerrado	1.498.644	2,56	1.489.256	2,54	-9.388	-0,02
Cerradão	354.972	0,61	353.388	0,60	-1.584	0,00
Vereda	406.765	0,69	406.253	0,69	-512	0,00
Total da Flora Nativa	19.764.985	33,71	19.655.230	33,52	-109.754	-0,19

4. Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido, demonstrado e operacionalmente aplicado um procedimento para detecção de modificações na cobertura do solo. A abordagem é relativamente simples proporciona melhorias aos procedimentos consagrados para detecção de modificações baseadas na radiometria de imagens, como por exemplo, diferenciação e razão de imagens, componentes principais e análise de vetor de mudanças. O método é menos sensível a discrepâncias geométricas e radiométricas entre as imagens multitemporais devido à abordagem em múltiplas escalas que foram desenvolvidas.

5. Referências

- Carvalho, L. M. T. et al. 2006a. Projeto monitoramento 2005. In: **Mapeamento e inventario da flora nativa e reflorestamentos de minas gerais**, edited by Scolforo, Jose Roberto Soares, and Luis Marcelo Tavares de Carvalho. Vol. 1, 58-63. Lavras: Editora UFLA.
- Carvalho, L. M. T. et al. 2006b. Procedimentos para mapeamento. In: **Mapeamento e inventario da flora nativa e reflorestamentos de minas gerais**, edited by Scolforo, Jose Roberto Soares, and Luis Marcelo Tavares de Carvalho. Vol. 1, 37-57. Lavras: Editora UFLA.
- Carvalho, L.M.T., Fonseca, L.M.G., Murtagh, F., Clevers, J.G.P.W. Change detection at multiple spatial scales with the aid of multiresolution wavelet analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.22, p.3871-3876, 2001.
- Carvalho, L. M. T. et al. 2007. Wavechange: a Procedure for Change Detection Based on Wavelet Product Spaces. In: **Annals of the Fourth International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images**, July 18-20, 2007 Provinciehuis Leuven, Belgium
- Carvalho, L. M. T. et al. 2008. Monitoramento da Flora Nativa 2005-2007. In: **Inventário Florestal de Minas Gerais**. Carvalho, L.M.T e Scolforo, J.R.S (Eds.), Vol. 1, 1-24. Lavras: Editora UFLA.
- Donoho, D.L. and Johnstone, I.M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. **Biometrika**, vol. 4, no. 81, pp. 425-455, 1994.
- Holschneider M., Kronland-Martinet, R., Morlet, J., Tchmitchian, P. A real time algorithm for signal analysis with the help of the wavelet transform. In Combes J.M., Grossman A., Tchmitchian P. (eds.), **Wavelets: Time Frequency Methods and Phase Space**, Springer-Verlag, New York, p.286-297, 1989.
- Oliviera Filho, A.T. et al. Difinição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do Estado de Minas Gerais. In: **Mapeamento e inventario da flora nativa e reflorestamentos de minas gerais**, edited by Scolforo, Jose Roberto Soares, and Luis Marcelo Tavares de Carvalho. Vol. 1, 21-35. Lavras: Editora UFLA. 2006.
- Persival, D.B. and Walden, A.T., **Wavelet Methods for Time Series Analysis**, Cambridge, University Press, 2000.
- Rosenfeld, A., Thurston, M. Edge and curve detection for visual scene analysis. **IEEE Transactions on Computers** v. 20, no. 5, p.562-659, 1971.
- Scolforo, J.R.S.; Carvalho, L.M.T. **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2006. 288p.
- Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, p.777-785, 1989.
- Veloso, H.P., Rangel Filho, A.L.R., Lima, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro, IBGE, 1991. 124p.